

Анализ процесса образования виртуального катода при торможении немодулированного и модулированного пучков в трубе показал, что в обоих случаях образуются колеблющиеся сгустки электронов, причем в случае моноскоростного пучка сгусток плотный, локализованный в пространстве.

Л и т е р а т у р а

1. Журавлева В. Д., Семенов С. О. // Прикладная физика. 2006. № 4. С. 60.
2. Привезенцев А. П., Фоменко Г. П. // Изв. вузов: Сер. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2. № 5. С. 56.
3. Егоров Е. Н., Калинин Ю. А., Короновский А. А. и др. // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 1. С. 51.
4. Молоковский С. И., Стенюкова Р. Е., Трегубов В. Ф. // Известия Ленинградского электротехнического института. 1973. Вып. 136. С. 17.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

Investigation of nonstationary electron beam dynamics in EOS EVD

S. O. Semenov

Federal State Unitary Enterprise «NPP "ALMAZ"», Saratov, Russia

The TWT one-, two- and fourstages collector characteristics with various ratio of their lengths and slow wave length are investigated, the differences under stationary and nonstationary model applications and influence of the value of beam grouping are determined. The dynamics of virtual cathode formation under monovelocity and modulated electron beam slowing is researched.

УДК 537.533

Аберрации масс-спектрометра с секторным магнитом и электростатической призмной системой

О. А. Байсанов

Военный институт Сил воздушной обороны, г. Актобе, Казахстан

Г. А. Доскеев, И. Ф. Спивак-Лавров

Актюбинский государственный университет им. К. Жубанова, г. Актобе, Казахстан

Рассмотрены аберрации и предельное разрешение ахроматического масс-спектрометра с секторным однородным магнитным полем и с электростатической системой, состоящей из иммерсионной трехэлектродной призмы и трансаксиальной линзы.

Введение

В настоящей работе исследуются аберрации и предельное разрешение ахроматического масс-спектрометра с секторным однородным магнитным полем и с электростатической системой, состоящей из иммерсионной трехэлектродной призмы и трансаксиальной линзы [1] при различных эмиттансах пучка.

Постановка задачи и компьютерный анализ

Принципиальная схема исследуемого масс-спектрометра изображена на рис. 1.

В табл. 1 приведены рассчитанные параметры ахроматического масс-спектрометра и величины, определяющие предельный эмиттанс ионного пучка, при котором последний полностью проходит через масс-спектрометр, не задевая полегающих поверхностей. За единицу длины принято расстояние d между плоскими электродами призмы и полюсами магнита. Считается, что потенциал в предметной области и области изображения равен V_0 .

Ось x декартовой системы координат совпадает с первой преломляющей гранью призмы, а начало координат — с вершиной призмы.

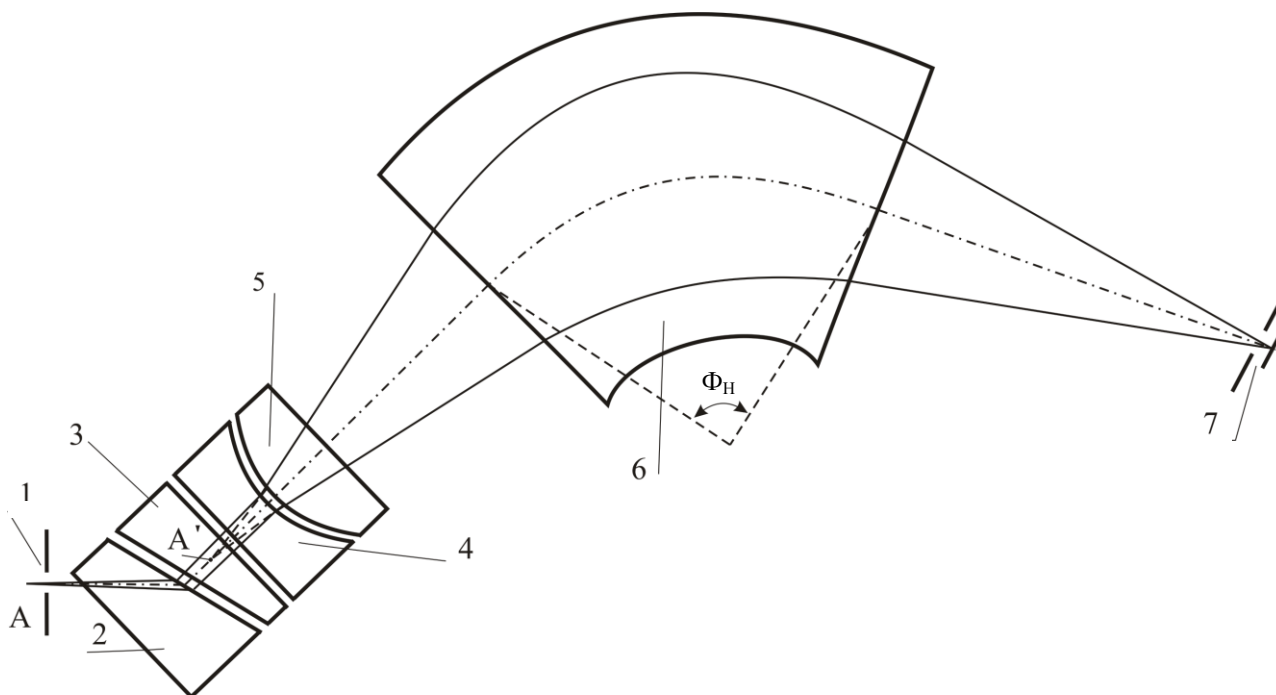


Рис. 1. Схема масс-спектрометра с электростатической призмой, трансаксиальной линзой и секторным однородным магнитным полем:

1 — щель источника ионов; 2—5 — электроды электростатической призмы и иммерсионной трансаксиальной линзы; 6 — полюса секторного магнита; 7 — щель приемника ионов

Численный анализ траекторий пучка в масс-спектрометре показал, что самое высокое разрешение достигается в плоскости $s = s_{cr} = 127,5$, где расположен кроссовер пучка. При этом гауссова

плоскость находится за кроссовером на расстоянии $\Delta s = 0,08$, где s — криволинейная координата, отсчитываемая вдоль осевой траектории пучка.

Таблица 1

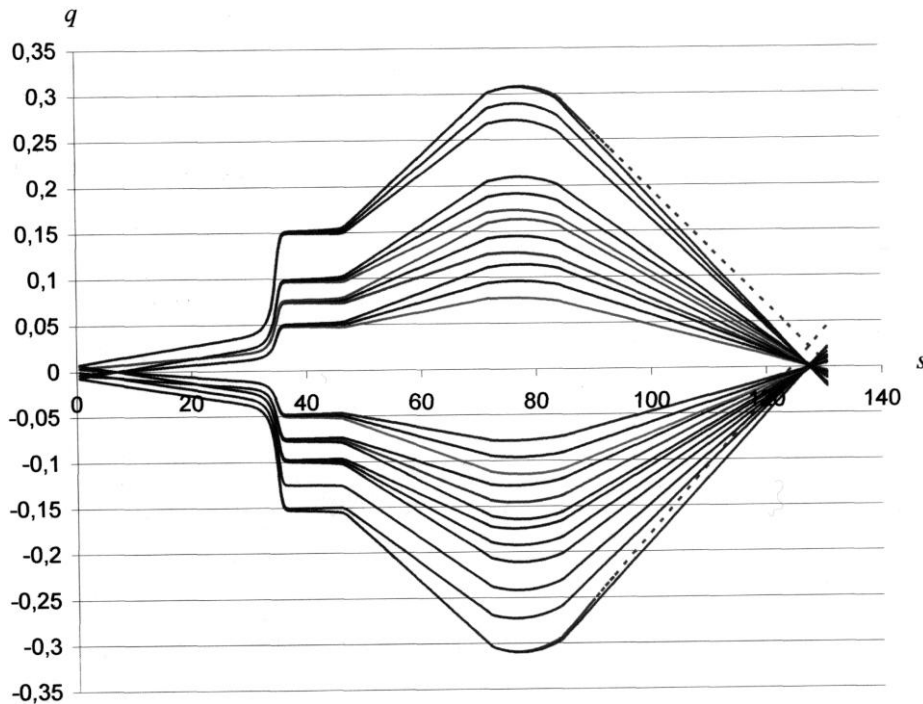
Параметры ахроматического масс-спектрометра и предельный эмиттанс ионного пучка

Элемент	Параметр	Определение параметра	Величина
Электростатическая призма	i	Угол падения на призму, град	75
	γ_e	Преломляющий угол призмы, град	12,4732
	l_u	Расстояние от источника ионов до места входа пучка в призму	40
	r_e	Расстояние от вершины призмы до места входа пучка в призму	25
	V_1/V_0	Отношение потенциалов на первой преломляющей грани	20
Трансаксиальная линза	V_2/V_0	Отношение потенциалов на электродах линзы	3,27665
	L_{ex}	x — координата центра кривизны линзы	28,9
	L_{ey}	y — координата центра кривизны линзы	28,96731
	R_e	Радиус кривизны линзы	25
Секторный магнит	$L_{hx} - L_{ex}$	x — координата вершины секторного магнита	3,9
	L_{hy}	y — координата вершины секторного магнита	12,05002
	r_0	Радиус кривизны траектории в магнитном поле	25
	γ_H	Секторный угол магнита, град	58
	$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$	Углы входа и выхода пучка в секторном магните, град	-15
Ионный пучок	Φ_H	Угол поворота пучка в секторном магните, град	28
	ϵ_u	Максимальный разброс по энергии	0,001
	q_u	Полуширина щели источника ионов	0,007
	q'_u	$2q'_u$ — угловая расходимость пучка ионов по горизонтали	0,001
	z_u	Полувысота щели источника ионов	0,11
z'_u	$2z'_u$ — угловая расходимость пучка ионов по горизонтали	0,001	

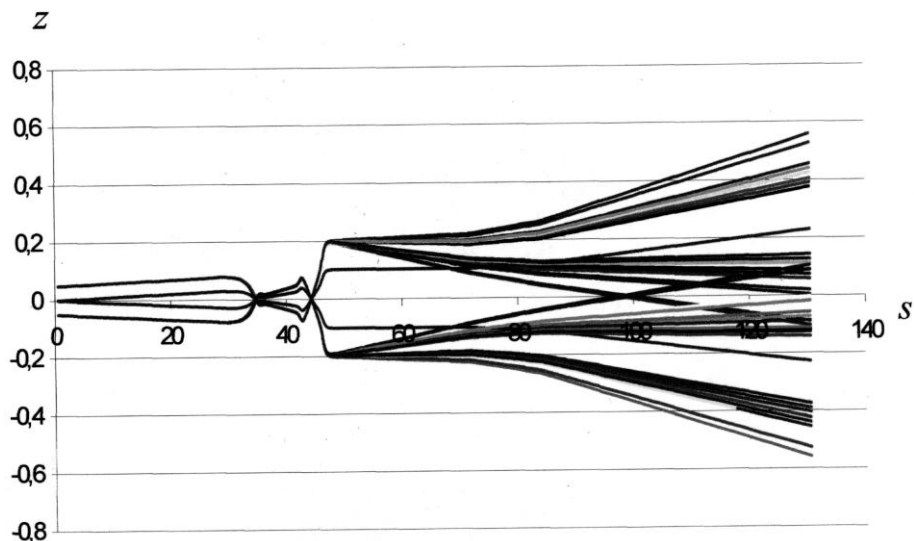
На рис. 2, *а* представлены проекции траекторий частиц ионного пучка в ахроматическом масс-спектрометре на горизонтальное направление при небольших начальных значениях z_0 и z'_0 , определяющих линейное и угловое отклонения от осевой траектории в вертикальном направлении. Для демонстрации разрешения пунктирными линиями показаны граничные траектории частиц пучка с относительным отклонением по массе $\gamma = 0,001$. По оси абсцисс на рис. 2, *а*, *б* отложена криволинейная координата s .

На рис. 2, *б* показаны проекции траекторий симметричного пучка на вертикальное направление с максимально возможными начальными значениями z_0 и z'_0 , при которых пучок полностью проходит через ахроматический масс-спектрометр.

С точностью до членов второго порядка малости по начальным параметрам для произвольной траектории пучка при $s = s_{cr}$ справедливо следующее выражение:



а



б

Рис. 2. Проекция траекторий пучка на:
а — среднюю плоскость; б — вертикальное направление

$$q_{cr} = q_{s_{cr}} = Mq_0 + A_2q'_0 + A_5\varepsilon + A_{11}q_0^2 + A_{12}q_0q'_0 + A_{22}q_0'^2 + A_{33}z_0^2 + A_{34}z_0z'_0 + A_{44}z_0'^2 + A_{15}q_0\varepsilon + A_{25}q_0'\varepsilon + A_{35}z_0\varepsilon + A_{45}z_0'\varepsilon + A_{55}\varepsilon^2, \quad (1)$$

где $q(s)$ — отклонение от осевой траектории в горизонтальном направлении;

$z(s)$ — то же, в вертикальном направлении;

штрихи — производные по s ;

ε — относительный разброс по энергии;

индекс "0" — величины, взятые при $s = 0$ в области щели источника ионов;

A_{ij} — абберационные коэффициенты второго порядка.

Для рассматриваемого ахроматического масс-спектрометра линейное увеличение в горизонтальном направлении $M = 0,189$. В гауссовой плоскости коэффициенты A_2 и A_5 равны нулю, а в кроссовере они равны, соответственно: $A_2 = 0,15774$, $A_5 = -0,03129$.

Значения абберационных коэффициентов второго порядка были вычислены путем интегрирования точных уравнений траектории при различных начальных условиях. Найденные таким образом значения абберационных коэффициентов второго порядка даны в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Значения абберационных коэффициентов второго порядка, обуславливающих геометрические абберации

A_{11}	A_{12}	A_{22}	A_{33}	A_{34}	A_{44}
0,632	38,4	583,0	-0,201	-28,7	934,0

Таблица 3

Значения абберационных коэффициентов второго порядка, обуславливающих хроматические и хроматогометрические абберации

A_{15}	A_{25}	A_{35}	A_{45}	A_{55}
11,0	375,0	0,159	-1,36	-18,1

По своим возможностям предлагаемый масс-спектрометр сопоставим с данными в [2], но имеет

более простую конструкцию. Так, если положить как в [2] $d = a = 6$ мм, то значение $q_u = 0,007$ соответствует ширине щели источника ионов $S_u = 2q_u = 84$ мкм.

Путем численного интегрирования точных уравнений траектории при различной величине z_u и z'_u вычислены значения разрешения по массе R и суммарные абберации масс-спектрометра Δ_{cr} в кроссовере пучка при $s = s_{cr}$.

Результаты расчета, полученные для значений $q_u = 0,007$, $q'_u = 0,001$, $\varepsilon_u = 0,001$, представлены в табл. 4. При расчетах предполагалось, что для траекторий частиц, выходящих из ионного источника, имеем: $-q_u \leq q_0 \leq q_u$; $-q'_u \leq q'_0 \leq q'_u$; $-\varepsilon_u \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u$; $-z_u \leq z_0 \leq z_u$; $-z'_u \leq z'_0 \leq z'_u$.

В кроссовере пучка $q_{min} \leq q_{cr} \leq q_{max}$, $-z_m \leq z_{cr} \leq z_m$.

Здесь q_{min} и q_{max} определяют размеры изображения в горизонтальном направлении $\Delta q_{cr} = q_{max} - q_{min}$, а z_m определяет размеры изображения в вертикальном направлении.

Суммарные абберации Δ_{cr} определялись как разница между Δq_{cr} и вычисленной в линейном (параксиальном) приближении шириной изображения щели источника в горизонтальном направлении:

$$\Delta_{cr} = \Delta q_{cr} - 2|M|z_u.$$

Даже при значениях z_u и z'_u , равных нулю, суммарные абберации Δ_{cr} не могут быть полностью объяснены абберациями второго порядка, которые описываются формулой (1). При выбранных параметрах источника и найденных значениях абберационных коэффициентов с помощью формулы (1) мы получим $q_{min} = -0,00122$, $q_{max} = 0,00238$, что дает $\Delta q_{cr} = 0,00360$.

Наблюдаемое несовпадение обусловлено, очевидно, абберациями более высокого порядка, которые дают в суммарные абберации вклад порядка 24 %.

Таблица 4

Зависимость разрешения R и суммарных аббераций Δ_{cr} от вертикальных размеров пучка

Вертикальные размеры пучка		Параметры пучка в кроссовере				Абберации и разрешение	
z_u	z'_u	q_{min}	q_{max}	Δq_{cr}	z_m	Δ_{cr}	R
0	0	-0,00161	0,00222	0,00383	0	0,001193	2866
0,0125	0,00025	-0,00258	0,00215	0,00481	0,23	0,002164	2287
0,025	0,0005	-0,00535	0,00202	0,00757	0,43	0,004929	1452
0,05	0,001	-0,00943	0,00114	0,01166	0,60	0,009010	944

Аберрации, связанные с выходом пучка из средней плоскости, существенно влияют на разрешение. При значениях z_u и z'_u , не равных нулю, уменьшение разрешения связано прежде всего с искривлением линий изображения в плоскости кроссовера.

Заключение

Наблюдаемое искривление невозможно описать только аберрациями второго порядка, связанными с аберрационными коэффициентами A_{33} , A_{34} и A_{44} .

Несимметричность искривления границ изображения, соответствующих отрицательным и положительным значениям q_{cr} , и их симметрия по отношению к знаку z_{cr} приводят к следующему выводу. Это искривление должно описываться аберрациями более высокого порядка, которые

обусловлены слагаемыми, содержащими z_0 и z'_0 в четных степенях, а q_0 и q'_0 — в нечетных.

При регистрации ионов с помощью позиционного детектора можно уменьшить влияние аберраций, связанных с искривлением линий изображения, т.е. получить примерно такое же разрешение, как и при $z_u = z'_u = 0$.

Литература

1. Baisanov O. A., Doskeev G. A., Spivak-Lavrov I. F. Calculation of Mass-Spectrometer with Sector Magnet, Electrostatic Prism and Transaxial Lens//7-th Int. Conf. on Charged Particle Optics, Trinity College, Cambridge, England. Abstracts 24—28 July 2006. P. 108, 109.
2. Ishihara M., Kammei Y., Matsuda H. A high-performance mass spectrometer for very small size//Nuc. Instr. & Meth. in Phys. Res. 1995. V. 363 A. P. 440—444.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

Aberration of mass-spectrometer with sector magnetic field and electrostatic prism system

O. A. Baisanov

Military Institute of Air Defense Forces, Aktobe, Kazakhstan

G. A. Doskeev, I. F. Spivak-Lavrov

Aktobe State University after name K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan

In the work are considered the aberration and limiting the mass resolution of the achromatic mass spectrometer with sector homogeneous magnetic field and with electrostatic system consisting from immersion three-electrode prism and transaxial lens.

УДК 537.533

Проектирование разрядной ячейки ионного источника с полым холодным катодом

А. Н. Козлов, И. С. Гайдукова, Д. Э. Гринфельд, А. М. Филачев

ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Найдена эффективная ионно-оптическая система ионного источника с холодным катодом для формирования ионного пучка диаметром до 150 мм с неоднородностью плотности ионного тока не более 5 % и энергией ионов от 1 до 3 кВ. Такие параметры пучка позволяют проводить травление полупроводниковых материалов без радиационных повреждений и недопустимых тепловых нагрузок при плотности ионного тока до 1 мА/см². Методом компьютерного моделирования определены параметры ионного пучка на выходе из разрядной ячейки, гарантирующие требуемую однородность плотности ионного тока при мультиплицировании разрядных ячеек, а также геометрические размеры электродов, обеспечивающие эти параметры.